

ETUDE DE STABILITE

Rappel

1 : Géométrie du navire

- ✓ Flottaison
- ✓ Perpendiculaires
- ✓ Tirant d'eau
- ✓ Déplacement, franc bord

2 : Flottabilité des corps

- ✓ Principe d'Archimède
- ✓ Enfoncement
- ✓ Flottabilité d'un navire, enfoncement

3 : Jaugeage des navires

- ✓ La jauge brute
- ✓ La jauge nette

4 : Couples de stabilité

- ✓ La stabilité transversale
- ✓ Couple de stabilité transversale
- ✓ La stabilité longitudinale, différence, tirants d'eau

5 : Mouvements de poids

- ✓ Transport vertical
- ✓ Transport horizontal transversal
- ✓ Transport horizontal longitudinal, changement d'assiette
- ✓ Changement de tirants d'eau
- ✓ Calcule du MTC, poids suspendu

6 : Carènes liquides

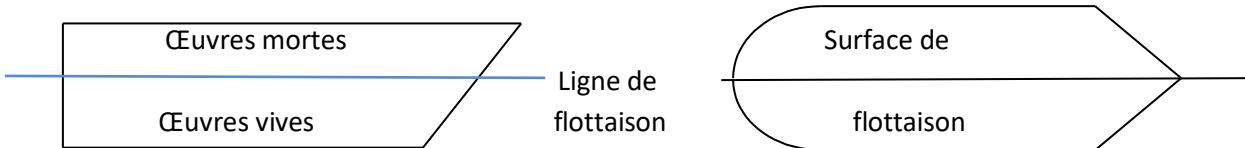
- ✓ Perte de stabilité
- ✓ Compartiments symétriques communiquant
- ✓ Cas des citernes non communiquant

7 : Echouage

- ✓ Point d'échouage sur la verticale du centre de flottaison
- ✓ Le point d'échouage est en dehors de la verticale de γ

ANNEXE : Formules de stabilité

1 : Géométrie du navire



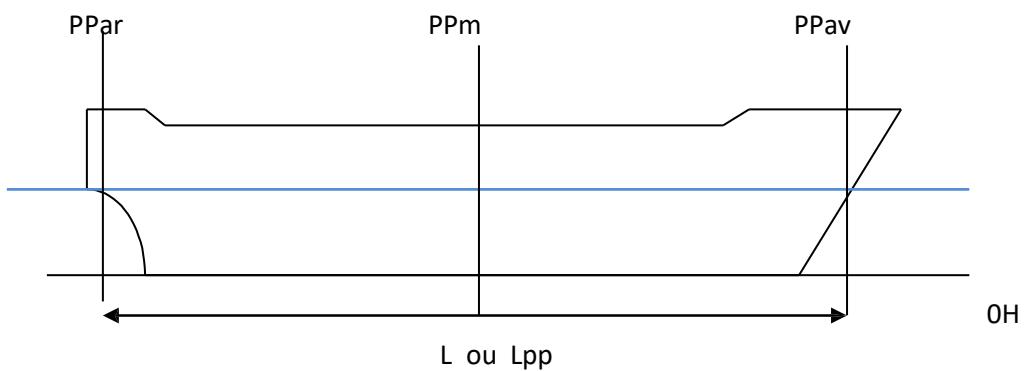
- ✓ **Flottaison conventionnelle** : C'est la flottaison du navire chargé à ses marques de franc-bord d'été parallèle à la ligne de quille.

Exposant de charge : C'est la partie de la coque comprise entre la flottaison lège et la flottaison en charge.

Creux sur quille : C'est la distance verticale qui sépare le dessus de la quille du pont complet le plus élevé, distance mesurée au milieu de la longueur du navire.

Plan de flottaison : C'est le plan de la surface libre du liquide

Ligne de flottaison : C'est l'intersection du plan de flottaison avec la surface extérieure du flotteur. Cette ligne délimite la surface de flottaison



- ✓ **Perpendiculaires** : Droites verticales perpendiculaires à la flottaison de référence. Perpendiculaire arrière (PPar) : qui passe par la mèche du gouvernail.

Perpendiculaire avant (PPav) : qui passe par l'intersection du profil avant de l'étrave avec la flottaison.

Perpendiculaire milieu (PPm) : qui est à mi-distance des deux précédentes.

Longueur entre perpendiculaires (L ou Lpp) : Distance entre les perpendiculaires arrière et avant.

Longueur hors tout : C'est la longueur maximum du navire.

- ✓ **Tirant d'eau Av, Ar et Mil** : Lus sur les perpendiculaires respectives.

Ligne d'eau zéro (OH) : Elle est confondue avec la ligne de quille.

Tirant d'eau moyen : $T_m = \frac{T_{av} + T_{ar}}{2}$

Déférence (D) : $Diff = \frac{T_{ar} - T_{av}}{2}$

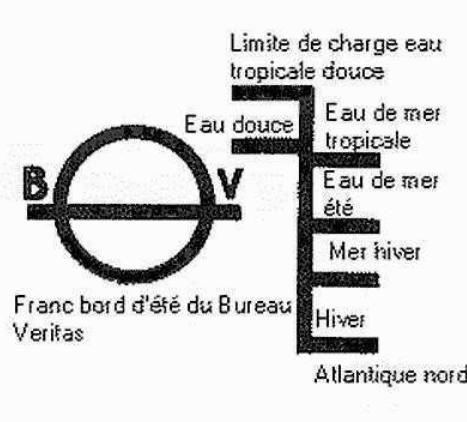
Elle peut être positive (navire sur le cul), négative (navire sur le nez) ou nulle.

- ✓ **Assiette** : On appelle « assiette du navire » le rapport Différence / Longueur entre perpendiculaires

$$\boxed{\text{Ass} = \frac{\text{Diff}}{\text{L}}}$$

- ✓ **Déplacement du navire** : C'est le poids du navire; on le mesure en tonne.

Port en lourd : C'est le poids maximum de marchandises et d'approvisionnements que le navire peut porter sans dépasser ses marques de franc bord.

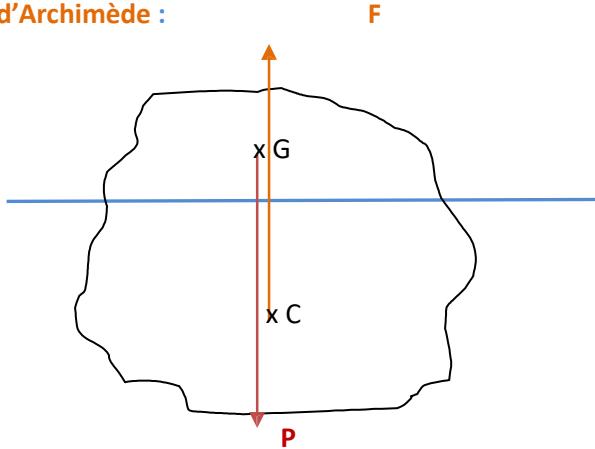


- ✓ **Franc-bord** : C'est la distance verticale mesurée au milieu du navire entre le bord supérieur de la ligne de pont le plus élevé possédant des dispositifs permanents de fermeture et le bord supérieur de la ligne de charge.

- ✓ **Jauge** : La jauge est le volume intérieur du navire, on le mesure en tonneaux de jauge. $1\text{tx} = 2,83\text{m}^3$
- ✓ **Carène** : Partie immergée du flotteur
- ✓ **Volume de carène** : Volume immergé du flotteur. C'est aussi le volume du liquide déplacé.
- ✓ **Centre de carène** : Centre de gravité du volume de liquide déplacé; c'est le centre de poussée C.

2 : Flottabilité des corps

✓ Principe d'Archimède :



Un corps flottant dans un liquide est soumis à deux forces verticales :

- Son poids P , appliqué au centre de gravité G .
- La réaction du liquide, poussée F , appliquée au centre de volume C .

✓ Formule d'Archimède :

$$F = V \cdot d \quad V = \text{le volume de la partie immergée et } d = \text{le poids volumique du liquide}$$

Mais comme F est égale au poids P du corps, on peut alors écrire :

$$P = V \cdot d$$

Notez que la densité (d) de l'eau douce est 1, et celle de l'eau de mer est généralement 1,026.

✓ L'enfoncement :

$$e = \frac{V}{S}$$

e représentant la surface.

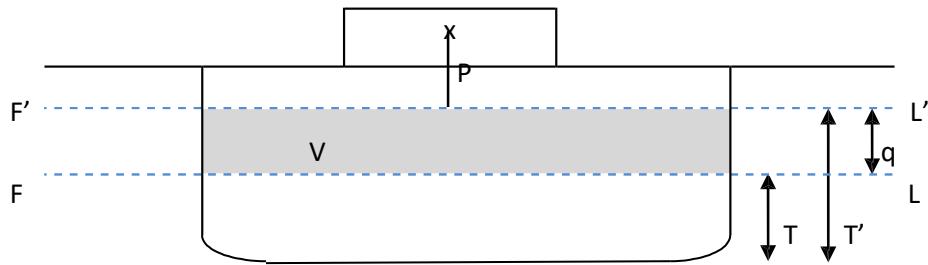
✓ Flottabilité d'un navire

Déplacement par centimètre (ΔP) :

Le déplacement par centimètre est le nombre de tonnes qu'il faut charger à bord pour faire enfoncer le navire d'un centimètre en eau de mer.

Considérons un navire flottant en eau de mer ($d = 1,026$) avec un tirant d'eau (T) et imaginons que nous chargeons ce navire d'un poids (p). Le navire va s'enfoncer et son nouveau tirant d'eau T' devient :

$$T' = T + q \quad (q \text{ représente l'enfoncement}).$$



En appliquant le principe d'Archimède, nous avons :

$$P = v.d \text{ avec } v = S.q$$

D'où : p = S.q.d

p représente le poids embarqué en tonne
 S la surface de flottaison en m²
 q l'enfoncement en m
 d le poids volumique de l'eau

✓ **Enfoncement en eau saumâtre (h) :**

$$h = \frac{P(1,026 - d')}{1,026 \cdot d'} S$$

3 : Jaugeage des navires

Un tonneau de jauge = 2,83m³

Convention d'Oslo de 1947 et 1965

Convention de Londres de 1969

Le calcul de la jauge d'un navire est fait par l'administration des douanes.

✓ **Jauge brute :**

Elle sert de base pour l'application des règles de sécurité des navires et dans la détermination de la composition de l'Etat-major (nombre d'officiers, brevets)

La jauge brute comptabilise :

- le volume des espaces situés sous le pont de tonnage (pont supérieur des navires qui n'ont pas plus d'un pont complet)
- le volume situé entre le pont de tonnage et le pont supérieur
- le volume des superstructures
- l'excédent d'écouilles.

✓ **Jauge net :**

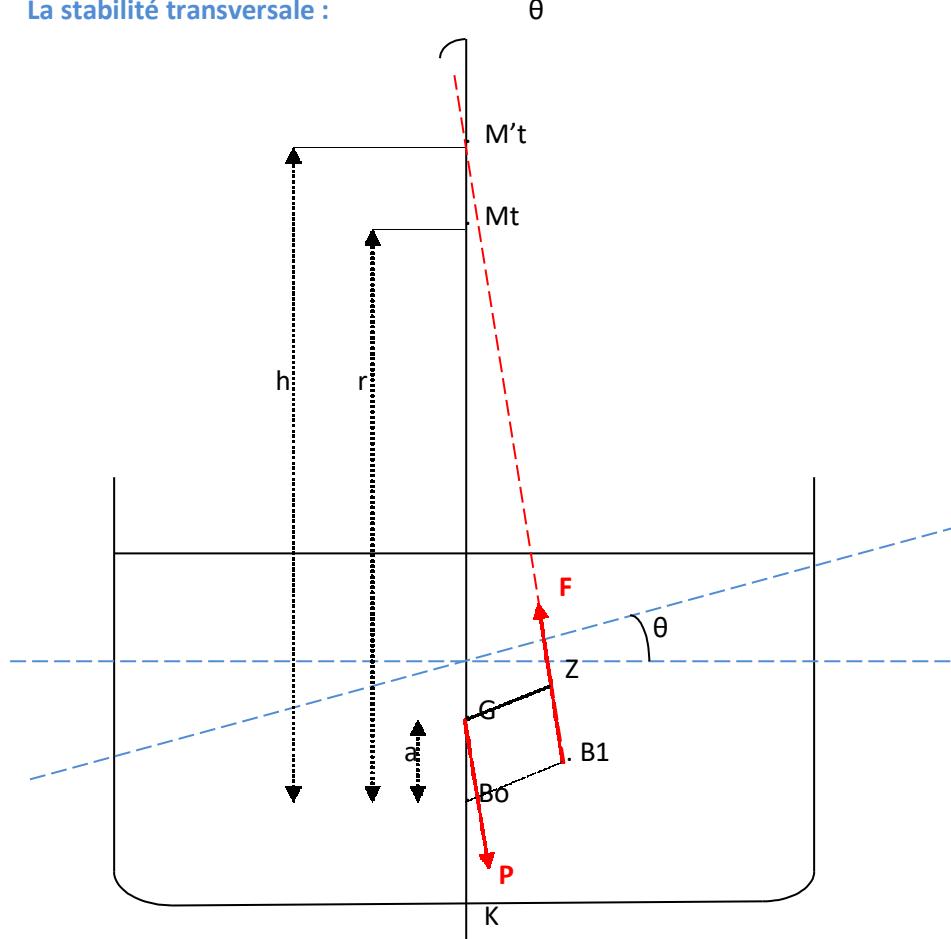
Elle est utilisée pour le calcul des divers droits.

C'est la jauge brute déduite de

- Des espaces réservés au capitaine et à l'équipage.
- Des espaces utilisés pour la navigation et les manœuvres.
- Les espaces machines

4 : Couples de stabilité

✓ **La stabilité transversale :**



Bo : Centre de carène initiale

B1 : Centre de carène du navire incliné

θ : Inclinaison du navire

G : Centre de gravité du navire

P : Poids ou déplacement du navire

F : Poussée d'Archimède

Couple (P,F) couple de stabilité transversale

M't : Point métacentrique

Mt : métacentre initiale transversale

BoM't = h = hauteur métacentrique transversale

BoMt = r = rayon métacentrique transversal

GBo = a = distance du centre de gravité au centre de carène

✓ **Déplacement du centre de carène:**

Considérons un navire droit, son centre de carène est Co (centre de carène initial). Pendant l'inclinaison du navire, le centre de carène se déplace en décrivant une courbe.

✓ **Couple de stabilité transversale:**

D'après la figure ci-dessus, sous l'action d'un couple de chavirement (vent, mer ...) le navire s'incline d'un angle θ . Le centre de carène B_0 se déplace et passe en B_1 ; il apparaît alors un couple de redressement (P, F) appelé « couple de stabilité transversale ».

Notons que $GM_t = (r-a)$ GM_t est appelé hauteur métacentrique.

Calculons le moment du couple :

$$Mt = P \cdot GZ = Px \cdot GM' \cdot \sin\theta$$

$$Mt = P \cdot (h - a) \cdot \sin\theta \text{ (pour une inclinaison quelconque).}$$

$$Mt = P \cdot (r - a) \cdot \sin\theta \text{ (pour une inclinaison inférieure à } 10^\circ\text{).}$$

$P(r-a)$ est appelé modèle de stabilité initiale transversale (MSIT).

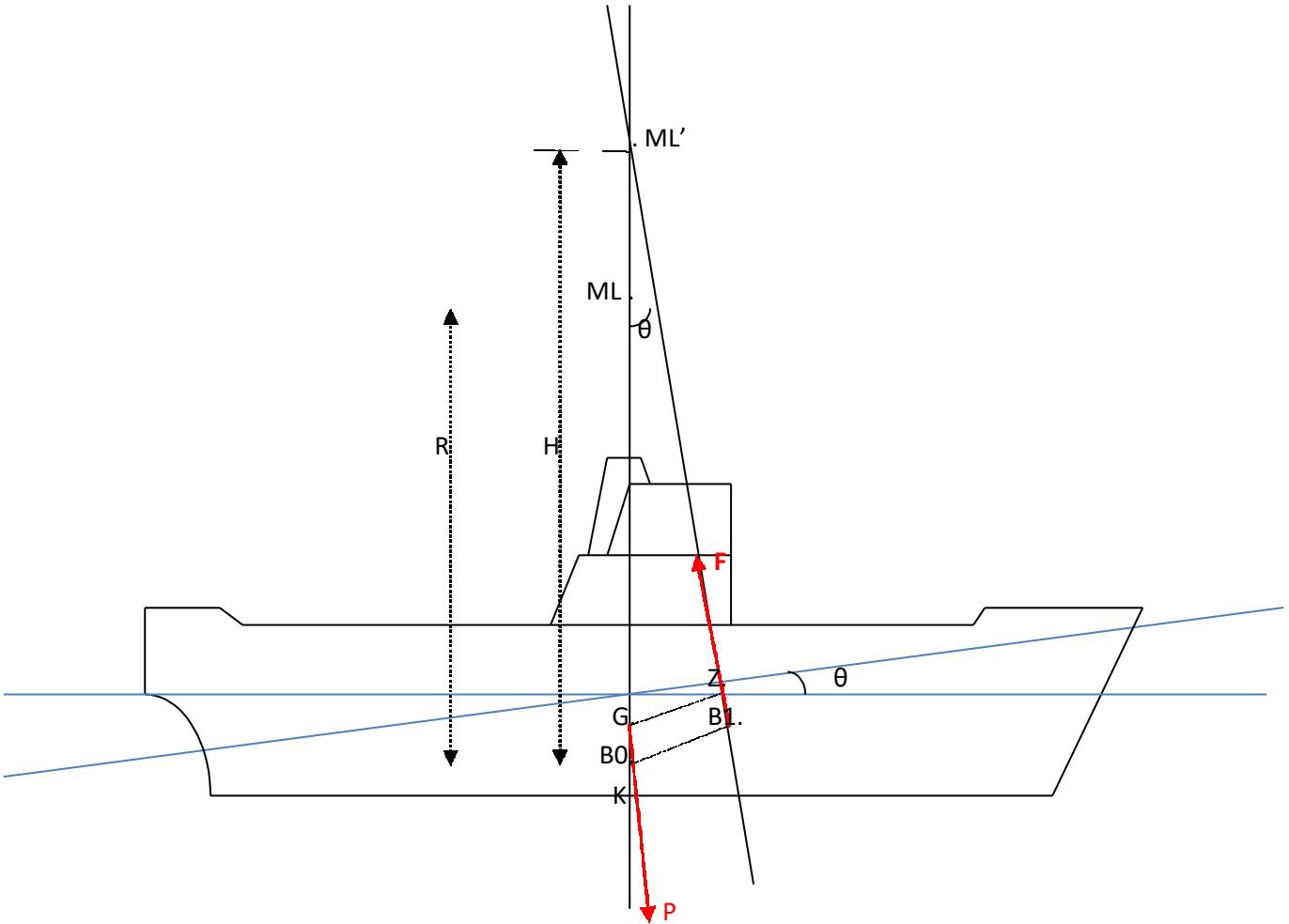
✓ **Valeur du rayon métacentrique :**

$$r = I / V$$

I : moment d'inertie de la surface de flottaison

V : volume de la carène pour le tirant d'eau considéré.

✓ **La stabilité longitudinale :**



P : déplacement du navire en tonne
a : distance verticale GCO en mètre

R : rayon métacentrique longitudinal en mètre
θ : inclinaison longitudinale en degré

Même démarche qu'avec la stabilité transversale, mais avec :

$$Mt = P(R - a) \cdot \sin\theta$$

P(R-a) est appelé module de stabilité initiale longitudinal (MSIL)

✓ **Calcul de la différence:**

A bord des navires nous trouvons un tableau mentionnant les éléments hydrostatiques sous la forme suivante :

P (t)	T (m)	LCB (m)	LCF (m)	KMt (m)	KMI (m)	KB
5 228,1	2,000	87,561	87,268	19,834	801,324	1,032
5 514,3	2,100	87,544	87,220	19,064	766,268	1,084
5 801,7	2,200	87,526	87,167	18,350	733,704	1,136

D'après le schéma ci-dessus nous avons :

$$\tan\theta = \frac{GZ}{ML.Z} = \frac{LCB - LCG}{KML - KG} \quad \text{or,} \quad \tan\theta = \frac{Diff}{L}$$

Alors :
$$\boxed{Diff = \frac{LCB - LCG}{KML - KG} \cdot L}$$

✓ **Calcul des tirants d'eau :**

$$\boxed{Tar = Tf + \frac{Diff \cdot LCF}{L}}$$

et

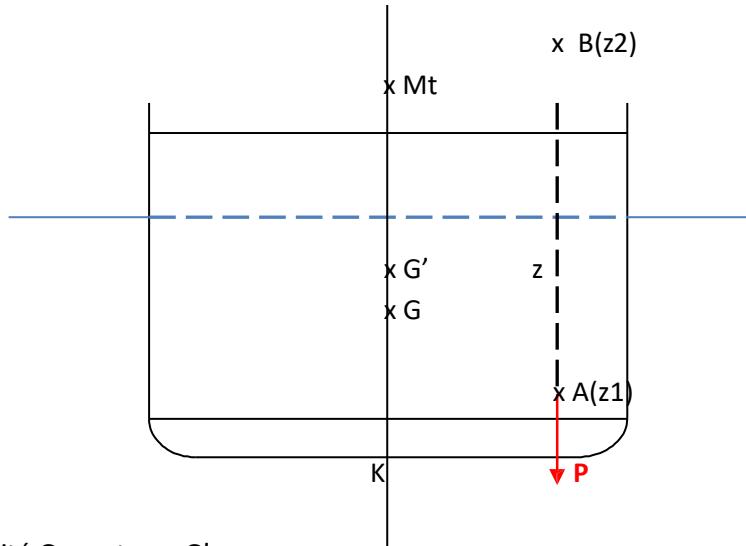
$$\boxed{Tav = Tf - \frac{Diff \cdot (L - LCF)}{L}}$$

Tf représente le Tirant d'eau flottaison que l'on calcule en fonction de LCF et P (déplacement).

5 : Mouvements de poids

✓ Le transport vertical

Lorsqu'un poids est déplacé à bord, vers le haut ou vers le bas tout en restant sur la même verticale, l'équilibre du navire n'est pas modifié (le navire reste droit). Par contre la stabilité change parce qu'en déplaçant le poids, nous faisons monter ou descendre le centre de gravité du navire.



Le centre de gravité G monte en G' .

Le nouveau module de stabilité transversale est :

$$P \cdot G' Mt = P (r-a)' = P (r-a) \pm p.z \quad + \text{ si le poids descend, - si le poids monte.}$$

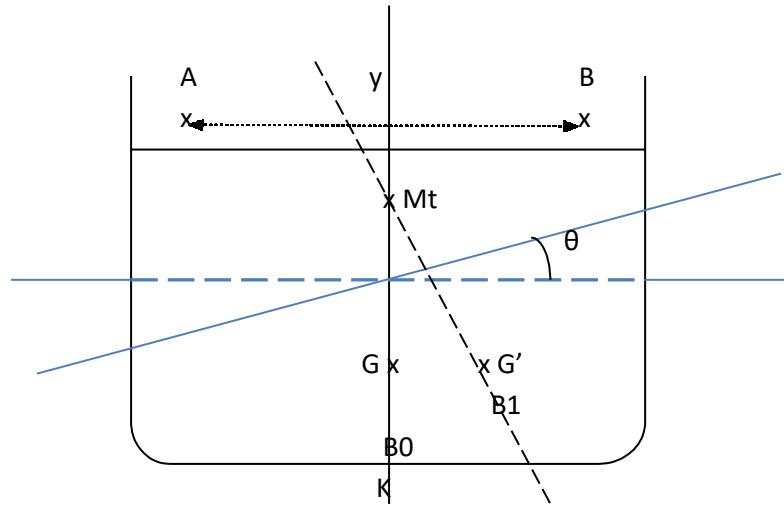
$$MSIT' = P (KMt - KG') = P (KMt - KG) \pm p.z$$

$$MSIT' = MSIT \pm p.z$$

P étant le poids déplacé

z étant la distance verticale de transport.

✓ **Transport horizontal transversal :**



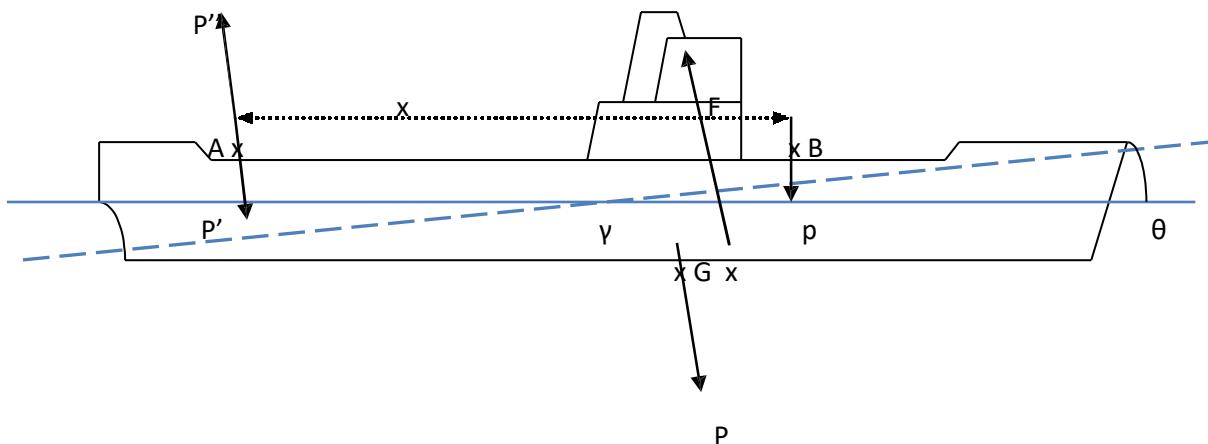
Lorsque le poids (p) est transporté de A vers B sur une distance (y), le centre de gravité (G) du navire se déplace en (G') et le navire s'incline d'un angle θ .

Pour une inclinaison faible nous avons :

$$\text{tg}\theta = \frac{py}{P(r-a)} \quad \text{et} \quad \theta = 57,3 \cdot \frac{py}{P(r-a)}$$

$$\text{Tan}\theta = \frac{py}{MSIT}$$

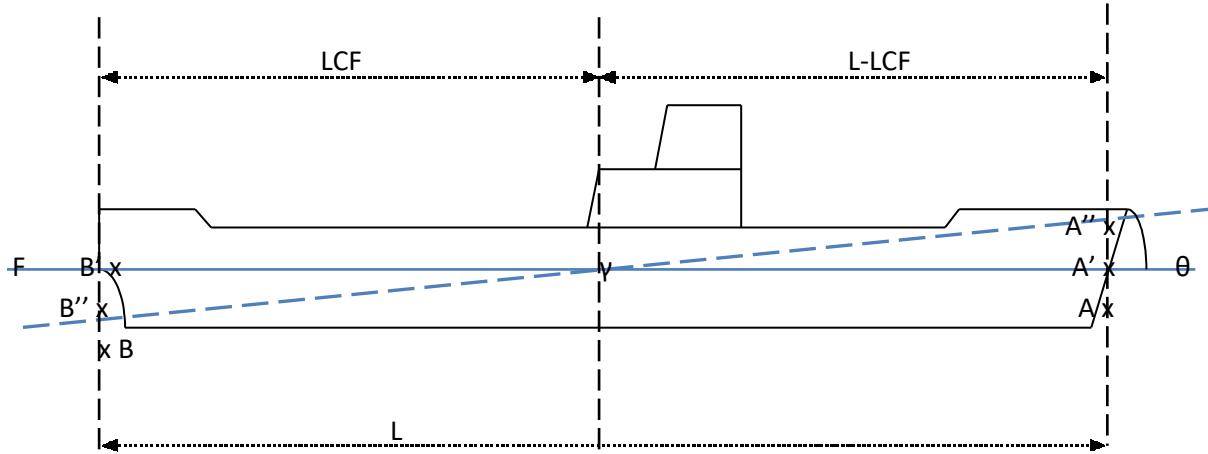
✓ **Transport horizontal transversal :**



Le poids (p) est transporté dans le sens de la longueur, sur une distance (y), vers l'avant ou vers l'arrière. Le navire va tourner autour d'un axe transversal passant par le centre de flottaison γ .

$$\begin{aligned} \text{tg} \theta x &= \frac{p x}{P (R-a)} \quad \text{et} \quad \theta x = 57,3 \frac{p x}{P (R-a)} \\ \text{Tg} \theta &= \frac{-p x}{MSIL} \end{aligned}$$

✓ **Changement d'assiette et tirant d'eau :**



✓ **Changement d'assiette :**

L'assiette primitive du navire était D/L , (D) étant la différence des premiers tirants d'eau. (D') est la différence des tirants d'eau après changement.

L'assiette devient D'/L avec :

$$\text{Diff}' = T'_{\text{ar}} - T'_{\text{av}}$$

La variation de la différence est $\Delta = \text{Diff}' - \text{Diff}$

$$\frac{\text{Tan } \theta = \text{Diff}'}{L} = \frac{L_{\text{CB}} - L_{\text{CG}}}{\text{KML} - \text{KG}}$$

La variation de l'assiette est :

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{\text{Diff}' - \text{Diff}}{L} = \frac{-px}{MSIL}$$

✓ **Changement de tirants d'eau :**

Les anciens tirants d'eau étaient $Tav = AA'$ et $Tar = BB'$

Après le transport de poids, les nouveaux tirants d'eau deviennent :

$$T'av = AA'' = Tav + A'A''$$

$$\text{et } T'ar = BB'' = Tar - B'B''$$

Soit $L - LCF = \text{distance entre } \gamma \text{ et } ppav$

$LCF = \text{distance entre } \gamma \text{ et } ppar$

Nous avons :

$$T'av = Tav - \frac{\Delta_{\text{diff}}}{LCF} \cdot (L - LCF)$$

$$T'ar = Tar + \frac{\Delta_{\text{diff}}}{LCF} \cdot L$$

Si (γ) est sur la PPm, alors les nouveaux tirants d'eau sont :

$$T'av = Tav \pm \frac{\Delta}{2} \quad \text{et} \quad T'ar = Tar \pm \frac{\Delta}{2}$$

✓ **Calcul du MTC :**

Il s'agit de déterminer le moment nécessaire pour faire varier la différence d'un 1 cm, soit :

$$\Delta\text{diff} = 1 \text{ cm} = \frac{1}{100} \text{ m}$$

$$\text{MTC} = -px$$

$$\Delta\text{diff} = \frac{1}{L} = \frac{-px}{MSIL} = \frac{\text{MTC}}{MSIL}$$

$$\text{MTC} = \frac{MSIL}{100L}$$

$$L \quad 100.L \quad \text{MSIL} \quad \text{MSIL}$$

$$100L$$

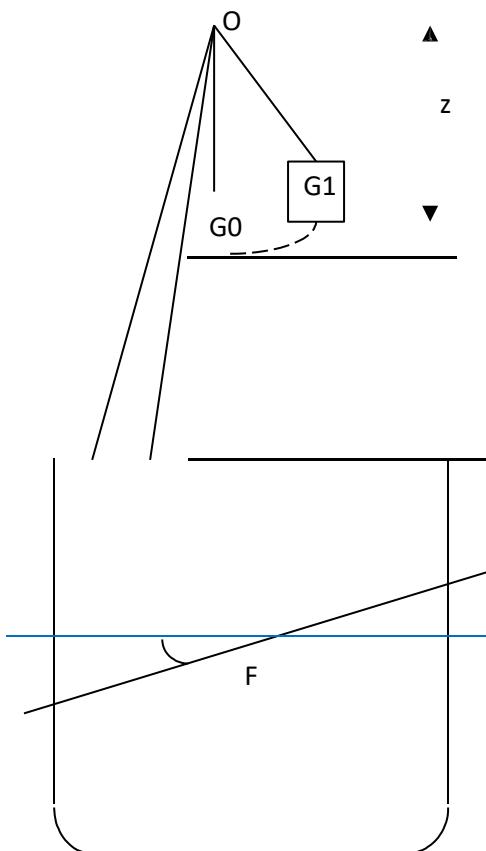
✓ **Poids suspendu :**

Un colis posé sur le pont est soulevé par la grue dont le sommet se trouve en O. Dès que le colis est soulevé, son poids p s'applique en G_0 . La hauteur à soulever n'influence pas sur le poids du navire. Tout se passe comme si la force était appliquée au point O.

Avoir un poids suspendu revient à l'élever brusquement au point O dès qu'il décolle du point.

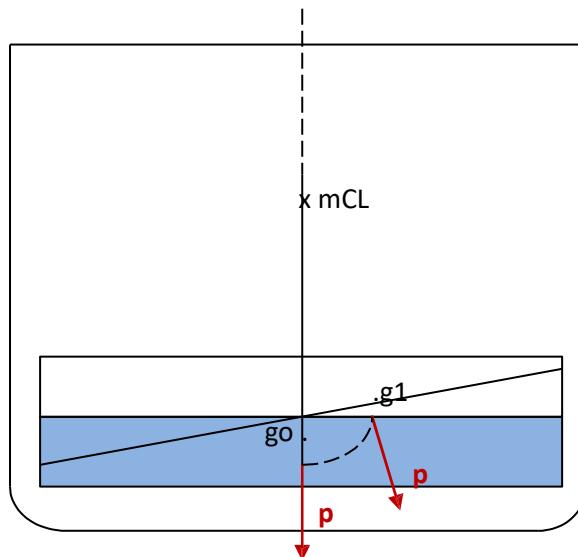
Le MSIT varie donc immédiatement pour donner :

$$\text{MSIT}' = \text{MSIT} - pz$$



6 : Carènes liquides

- ✓ Perte de stabilité :



Le liquide contenu dans une capacité non pleine se déplace suivant un axe centré en mCL (métacentre de la carène liquide) et de rayon rCL.

$$rCL = \frac{i\Delta}{V}$$

$i\Delta$ es le moment quadratique de la surface libre par rapport à son axe d'inclinaison.
 V est le volume du liquide dans sa capacité

Soit ω le poids volumique du liquide, nous avons :

$$P = \omega \cdot V$$

$$MSIT_{ccl} = MSIT - \sum \omega_i$$

(lorsque qu'il y a plusieurs carènes liquides).

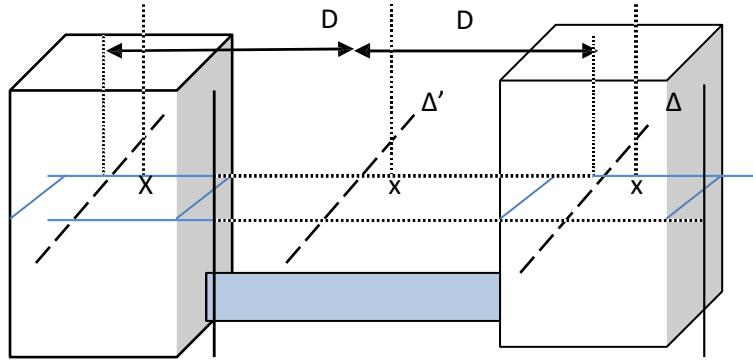
ω_i représente la perte de stabilité transversale

Le poids du liquide est $p = \omega \cdot V$

De même, nous pouvons écrire que

$$MSIT_{ccl} = P (K_Mt - K_G) - \frac{\sum \omega_i}{P}$$

- ✓ Compartiments symétriques communiquant:



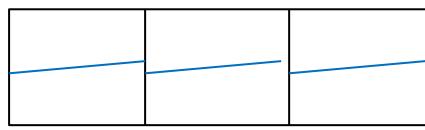
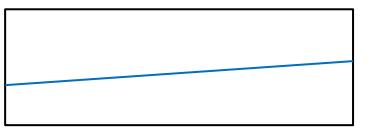
Les deux liquides et les capacités étant identiques, la somme des pertes de stabilité sont :

$$\Sigma \omega \cdot i = 2 \cdot \omega \cdot i \Delta' = 2 \cdot \omega (i \Delta + S \cdot D^2) \quad (D \text{ au carré}). \quad S \text{ représentant l'air d'une}$$

$$\text{des deux surfaces. } MSIT'ccl = MSITccl - 2 \cdot \omega \cdot S \cdot D^2 \quad \text{La perte de}$$

stabilité est $2 \cdot \omega \cdot S \cdot D^2$

- ✓ Cas des citernes non communiquant :

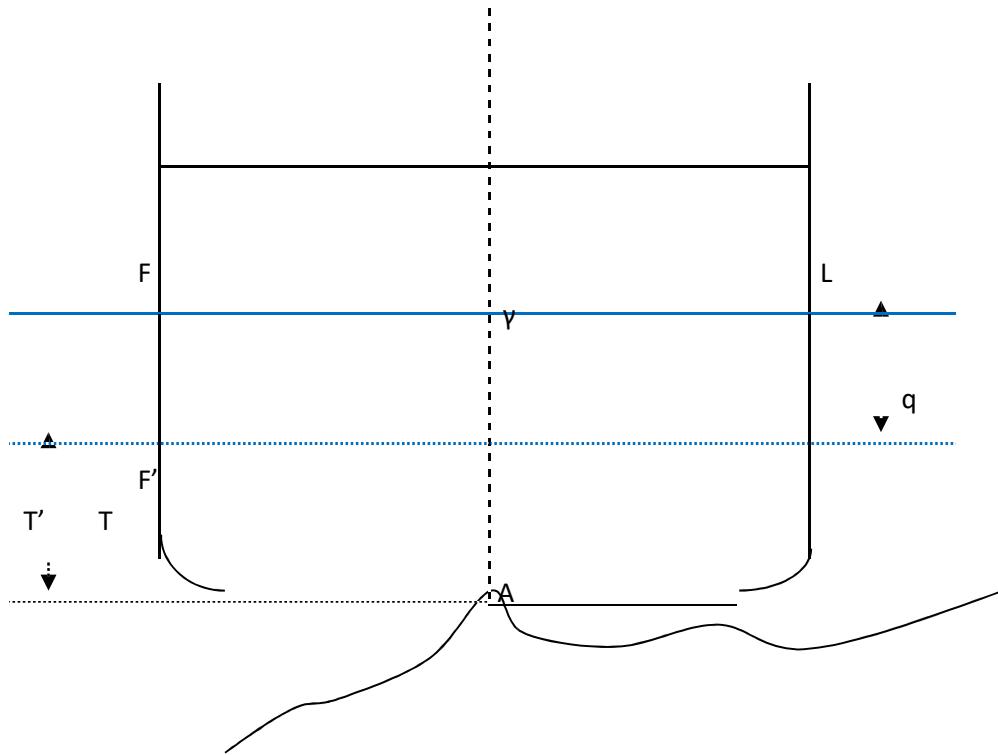


$$MSITccl = MSIT - \Sigma \omega \cdot i \Delta$$

$$i \Delta = \frac{L \cdot l^3}{3} \quad (l \text{ au cube})$$

7 : Echouage

- ✓ Point d'échouage sur la verticale du centre de flottaison (γ)



Le navire est échoué en un point « A » situé sur la verticale γ . Avant que l'eau s'abaisse, le tirant d'eau était « T ». Ensuite il devient « T' » avec un déjaugeage de $F'F$ qui est aussi q .

- ✓ Le déjaugeage est : $q = T - T'$

Le navire s'appuie sur le fond qui répond par une force de réaction appelée « poussée ».

Cette poussée s'exprime :

$$p = Sqd$$

S : surface de flottaison
d : poids volumique de l'eau.

Si la surface de flottaison n'est pas connue, il est nécessaire de prendre le déplacement par centimètre (TPC) que l'on trouve dans les documents.

$$p = q \cdot TPC$$

- ✓ Module de stabilité transversal

La diminution de stabilité est $p \cdot TFm$ TFm est le tirant d'eau flottaison moyen.

$$MSIT' = MSIT - p \cdot TFm$$

✓ **Chavirement d'un navire:**

Il s'agit de savoir pour quel déjaugeage, le navire risque-t-il de chavirer si la mer continue à baisser.

C'est-à-dire quand

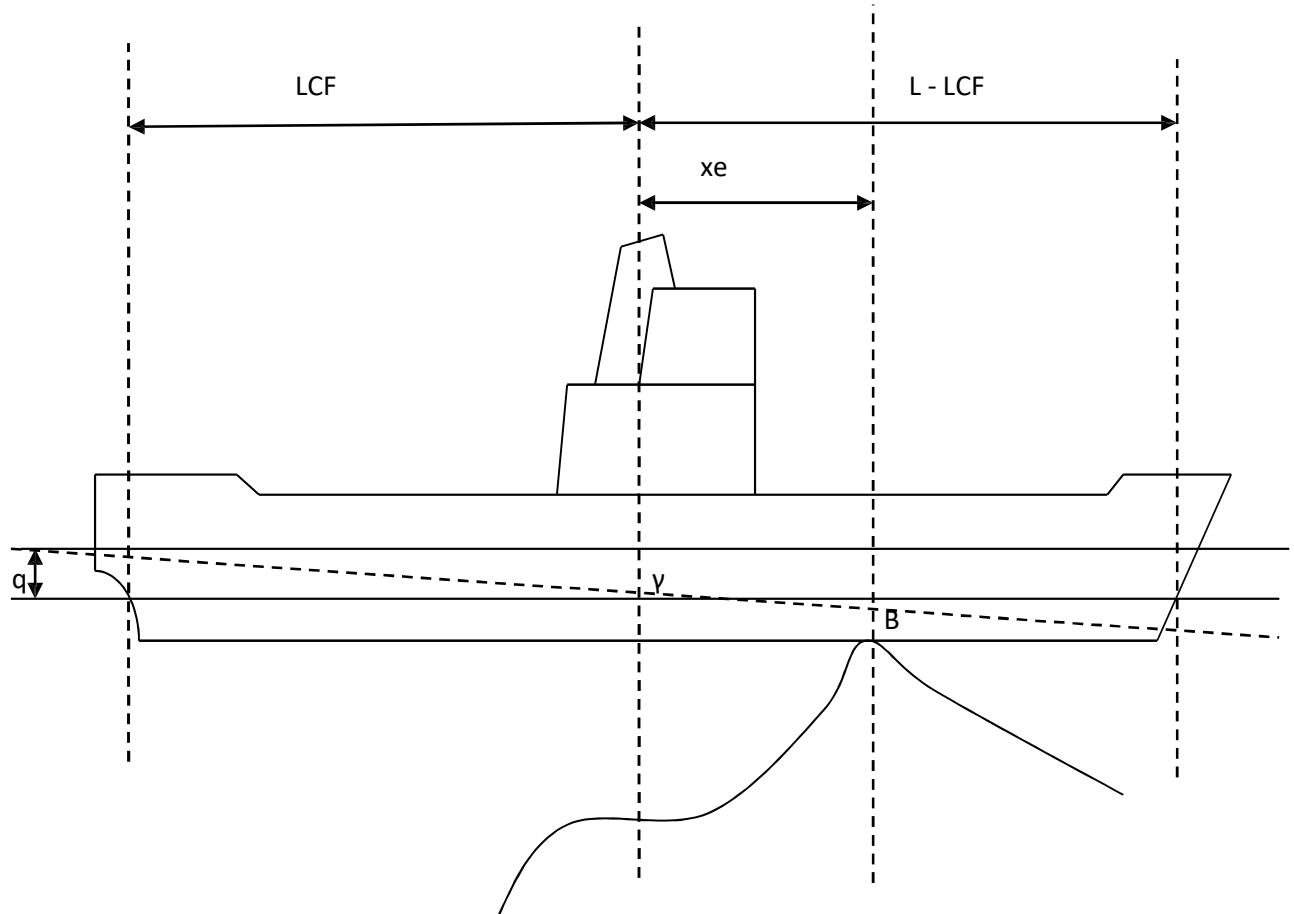
$$P (GM_t) - p.T_m = 0$$

Ou

$$S.q.d.T_m = P (GM_t)$$

Donc : $q = P(GM_t)$
 $S.d.T_m$

✓ **Le point d'échouage est en dehors de la verticale y :**



La position du point d'échouage est :
$$\frac{\Delta \text{Diff}}{L \cdot p} = \frac{-p(\text{LCF} - \text{xe})}{\text{MSIL} \cdot \text{xe}}$$

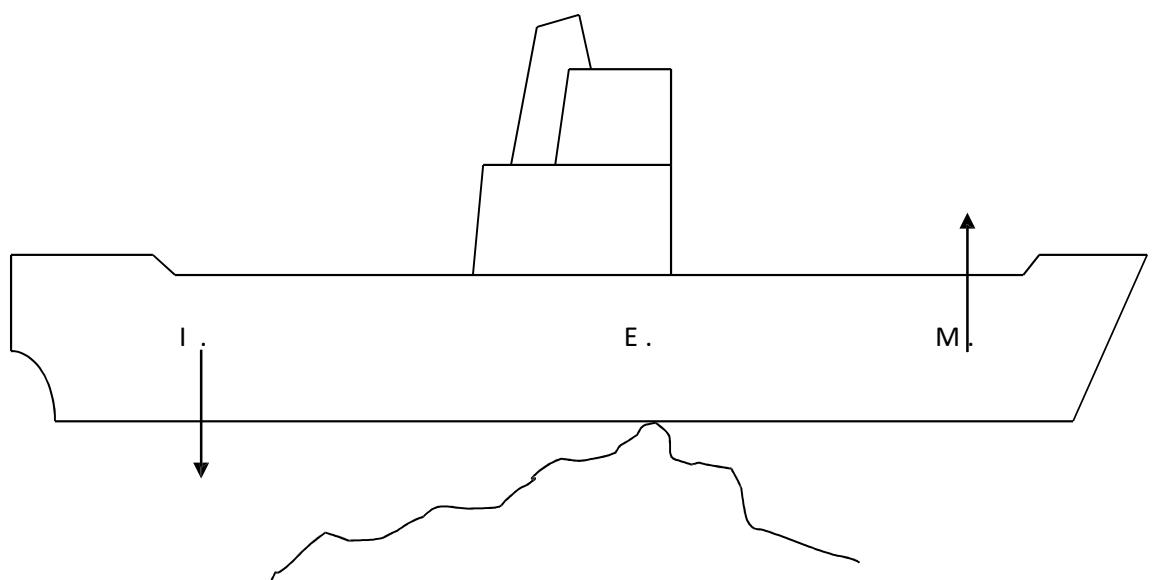
$$\text{xe} = \frac{\Delta \text{Diff} \cdot \text{MSIL}}{L \cdot p}$$

Point d'indifférence :

Le point d'indifférence représente le point d'échouage qui ne fera pas varier les tirants d'eau.

Sa formule est :
$$\frac{x_i = \Delta \text{Tar} \cdot L}{\Delta \text{Diff}}$$

- ✓ Poids à décharger pour déséchouer le navire :



$$P \cdot IM = PE \cdot IE \quad \text{donc} \quad \frac{P}{IM} = \frac{PE}{IE}$$

✓ **Définition terme Echouage/Echouement**

Un navire échoué est un navire qui a touché le fond et ne peut plus avancer. Selon les raisons qui ont provoqué cette situation, on parle alors d'échouage ou d'échouement.

L'échouage

L'échouage est volontaire contrairement à l'échouement. Il s'agit d'un acte délibéré de l'équipage qui va intentionnellement faire toucher le fond à son bateau.

C'est le cas de l'abattage en carène, qui consiste à s'échouer volontairement pour intervenir sur les œuvres vives. On utilise également l'échouage pour débarquer sur une plage par exemple (pour les bateaux qui le permettent)

L'échouement

L'échouement est involontaire et relève de l'accident. Si le bateau a touché le fond et ne réagit plus à la barre, il s'agit bel et bien d'un échouement. Si c'est uniquement la quille qui touche le fond et que le bateau réagit encore à la barre, il s'agit d'un talonnage. Le bateau peut encore naviguer, mais le choc a pu créer des dommages, comme une voie d'eau par exemple.

FORMULES DE STABILITÉ

Centre de Gravité	:	$xG = LCG$
		$zG = KG$
		$yG =$ sur le côté par rapport à l'axe (gîte)
Stabilité	:	$Tirant d'eau moyen \quad Tm = \frac{Tar+Tav}{2}$
		$Différence \quad Diff = Tar-Tav \quad Diff = \frac{LCB-LCG}{KMI - KG}$
Tirants d'eau	:	$Tar = TF + \frac{Diff}{L} \cdot LCF \quad (TF tirant d'eau flottaison)$
		$Tav = TF - \frac{Diff}{L} \cdot (L - LCF)$
Gîte	:	$\theta = 57,3 \frac{p.y}{MSIT'}$
Assiette	:	$\tan\beta = \frac{-px}{MSIL}$
Métacentre transversal:		$MSIT' = MSIT \pm pz \quad MSIT = P \cdot GMt \quad \text{avec } GMt = (KMt - KG)$
Métacentre longitudinal :		$MSIL = P \cdot GML$
Transfert de poids	:	$T'ar = Tar + \frac{\Delta Diff}{LCF} \cdot LCF \quad T'av = Tav - \frac{\Delta diff}{L} \cdot (L - LCF)$
		$\frac{\Delta Diff}{L} = \frac{-p(x-LCF)}{MSIL} \quad MTC = \frac{MSIL}{100L} \quad \text{et} \quad \Delta Diff = \frac{-p(x-LCF)}{MTC}$
Carènes liquides	:	$KMt = r + KB$

Sans communication : $MSIT_{ccl} = MSIT - \Sigma \omega i \Delta$

$$i\Delta = \frac{L \cdot I_3}{12} \quad (\text{perte de stabilité})$$

Si ballasts communiquant : $MSIT_{ccl'} = MSIT_{ccl} - 2\omega SD2$ ($D = \text{distance axe / cdg}$).

$2\omega SD2$ représente la perte de stabilité

Fin